

第四章

三相变压器的不对称运行及瞬态过程

- 对称分量法
- 三相变压器的各序阻抗及其等效电路
- 三相变压器 Y_{yn} 连接单相运行
- 变压器二次侧突然短路时的瞬态过程
- 变压器空载合闸时的瞬态过程



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

重点分析

- 不对称运行的分析方法: 对称分量法
- 正序阻抗、负序阻抗及零序阻抗的物理概念及测量方法
- 危害性——三相变压器在 Y_{yn} 连接时相电压中点浮动的的原因及其危害



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

§ 4-1. 对称分量法

➤ **不对称**：各相电流(或电压，电势)幅值有可能不同，相位也不依次差 120°

➤ 不对称运行状态的**主要原因**：

外施电压不对称：三相电流也不对称

各相负载阻抗不对称：当初级外施电压对称，三相电流不对称。不对称的三相电流流经变压器，导致各相阻抗压降不相等，从而次级电压也不对称。

外施电压和负载阻抗均不对称



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

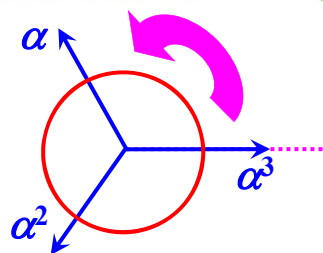
§ 4-1. 对称分量法

➤ **复数算子** $\alpha = e^{j120^\circ} = e^{-j240^\circ}$

$$\alpha = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ$$

$$\alpha^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ}$$

$$\alpha^3 = e^{j360^\circ} = e^{j0} = 1$$



➤ **对称的三相系统**：三相中的电压 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 对称，只有一个独立变量

➤ 如三相相序为 a 、 b 、 c ，由 \dot{U}_a 得出其余两相电压：

$$\dot{U}_b = \alpha^2 \dot{U}_a$$

$$\dot{U}_c = \alpha \dot{U}_a$$

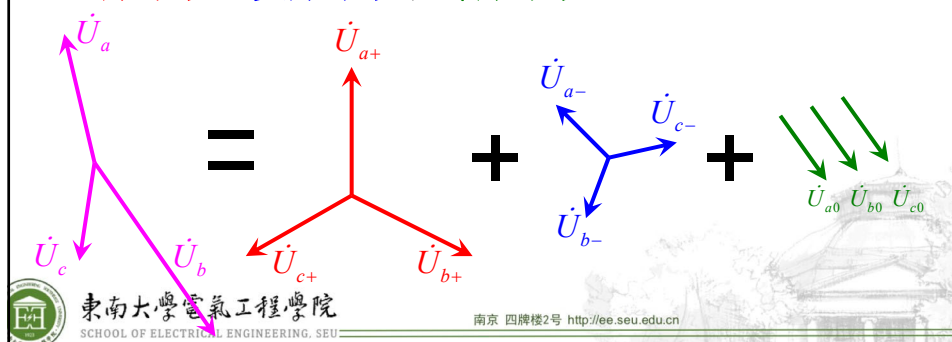


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

§ 4-1. 对称分量法

- ▶ 三相不对称系统：三相中的电压 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 互不相关大小不一定相等，相位关系不固定
- ▶ \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 为三个独立变量
- ▶ 把不对称的三相系统分解为三个独立的对称系统，即正序系统、负序系统和零序系统



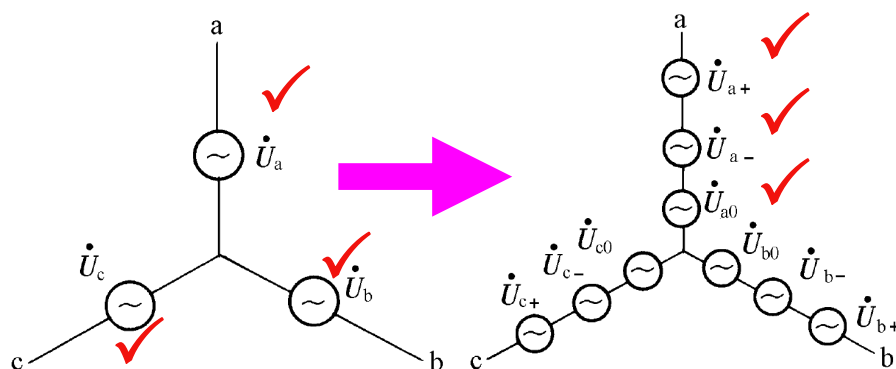
§ 4-1. 对称分量法

- ▶ \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 为不对称三相电压

不对称电压	正序	负序	零序
\dot{U}_a	$= \dot{U}_{a+}$	$+ \dot{U}_{a-}$	$+ \dot{U}_{a0}$
\dot{U}_b	$= \dot{U}_{b+}$	$+ \dot{U}_{b-}$	$+ \dot{U}_{b0}$
\dot{U}_c	$= \dot{U}_{c+}$	$+ \dot{U}_{c-}$	$+ \dot{U}_{c0}$

- ▶ 下标“+”、“-”、“0”分别表示正序、负序和零序

§ 4-1. 对称分量法



以 \dot{U}_{a+} 、 \dot{U}_{a-} 、 \dot{U}_{a0} 为三个独立变量，其他6个变量均为不独立变量，受约束条件的限制

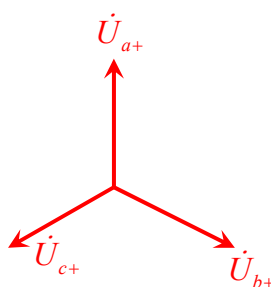


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

1-1. 正序系统 \dot{U}_{a+} 、 \dot{U}_{b+} 、 \dot{U}_{c+}

► 约束条件 $\dot{U}_{b+} = \alpha^2 \dot{U}_{a+}$ $\dot{U}_{c+} = \alpha \dot{U}_{a+}$



► 性质：每相大小相等，彼此相位差 120° ，相序为 $a \rightarrow b \rightarrow c$

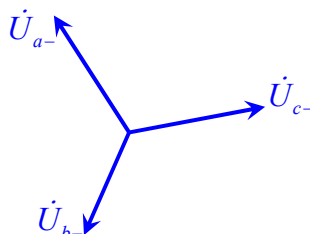


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

1-2. 负序系统 \dot{U}_{a-} 、 \dot{U}_{b-} 、 \dot{U}_{c-}

► 约束条件 $\dot{U}_{b-} = \alpha \dot{U}_{a-}$ $\dot{U}_{c-} = \alpha^2 \dot{U}_{a-}$



► 性质：每相大小相等，彼此相位差 120° ，相序为 **$a \rightarrow c \rightarrow b$**



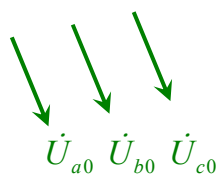
東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

1-3. 零序系统 \dot{U}_{a0} 、 \dot{U}_{b0} 、 \dot{U}_{c0}

► 约束条件

$$\dot{U}_{a0} = \dot{U}_{b0} = \dot{U}_{c0}$$



► 性质：每相大小相等，且同相位



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

§ 4-1. 对称分量法

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_{a+} + \dot{U}_{a-} + \dot{U}_{a0} & \dot{U}_{a+} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \alpha\dot{U}_b + \alpha^2\dot{U}_c) \\ \dot{U}_b &= \alpha^2\dot{U}_{a+} + \alpha\dot{U}_{a-} + \dot{U}_{a0} & \dot{U}_{a-} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \alpha^2\dot{U}_b + \alpha\dot{U}_c) \\ \dot{U}_c &= \alpha\dot{U}_{a+} + \alpha^2\dot{U}_{a-} + \dot{U}_{a0} & \dot{U}_{a0} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c) \end{aligned}$$

东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

§ 4-1. 对称分量法

以上分析，同样适合于电流的情况：

不对称电流 正序 负序 零序

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a+} + \dot{I}_{a-} + \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b+} + \dot{I}_{b-} + \dot{I}_{b0} \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c+} + \dot{I}_{c-} + \dot{I}_{c0} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{a+} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \alpha\dot{I}_b + \alpha^2\dot{I}_c)$$

$$\dot{I}_{a-} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \alpha^2\dot{I}_b + \alpha\dot{I}_c)$$

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c)$$

从此式可以看出：无中线，
则必定无零序电流

§ 4-1. 对称分量法

如果三相电压不对称，且三相电压之和始终为 0，则利用对称分量法，可以分解出（ ）。

- A. 仅仅负序分量
- B. 零序分量
- C. 正序+负序
- D. 正序+负序+零序



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

§ 4-1. 对称分量法

例：设有一不对称三相电压，
将其分解为对称分量。

$$u_a = \sqrt{2} \cdot 100 \cos(\omega t + 30^\circ)$$

$$u_b = \sqrt{2} \cdot 80 \cos(\omega t - 60^\circ)$$

$$u_c = \sqrt{2} \cdot 50 \cos(\omega t + 90^\circ)$$

显然，各相大小不等，相位差也不相同，为不对称电压。

表示为复数形式：

$$\dot{U}_a = 100 \angle 30^\circ = 100(\cos 30^\circ + j \sin 30^\circ) = 86.6 + j50 \text{ V}$$

$$\dot{U}_b = 80 \angle -60^\circ = 80(\cos 60^\circ - j \sin 60^\circ) = 40 - j69.3 \text{ V}$$

$$\dot{U}_c = 50 \angle 90^\circ = 50(\cos 90^\circ + j \sin 90^\circ) = 0 + j50 \text{ V}$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

分解为对称分量：

$$\begin{aligned}\dot{U}_{a+} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \alpha\dot{U}_b + \alpha^2\dot{U}_c) \\ &= \frac{1}{3}((86.6 + j50) + (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})(40 - j69.3) + (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})(0 + j50)) \\ &= 56.6 + j31.43 \quad V\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{a-} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \alpha^2\dot{U}_b + \alpha\dot{U}_c) \\ &= \frac{1}{3}((86.6 + j50) + (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})(40 - j69.3) + (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})(0 + j50)) \\ &= -12.2 + j8.33 \quad V\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{a0} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c) \\ &= \frac{1}{3}((86.6 + j50) + (40 - j69.3) + (0 + j50)) \\ &= 42.2 + j10.23 \quad V\end{aligned}$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

§ 4-2. 三相变压器的各序阻抗及其等效电路

要点

- (1) 正序、负序和零序系统都是对称系统。
当求得各个分量后，再把各相的三个分量叠加便得到不对称运行时的结果。
- (2) 不同相序具有不同阻抗参数。



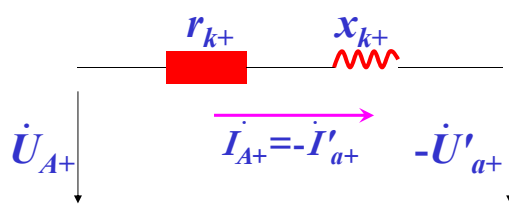
東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

正序阻抗及其等效电路

- 正序电流所遇到的阻抗：正序阻抗 Z_+

一次侧A相绕组上的正序电压 \dot{U}_{A+}



$$Z_+ = r_{k+} + jx_{k+} = r_k + jx_k = Z_k$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

负序阻抗及其等效电路

1、不论变压器绕组连接方式如何，负序电流、正序电流都能流通。

2、不论变压器的磁路系统如何(独立或者相关)，负序磁通与正序磁通的磁路相同。

因此，负序系统、正序系统有相同的等效电路，且负序电流、正序电流遇到的阻抗是相同的。



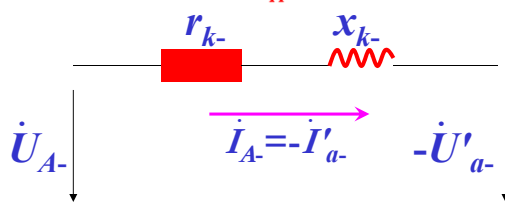
東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

负序阻抗及其等效电路

- 负序电流所遇到的阻抗：负序阻抗 Z_-
- 具有与正序一样的性质

一次侧A相绕组上的负序电压 \dot{U}_{A-}



$$Z_- = r_{k-} + jx_{k-} = r_k + jx_k = Z_k$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

变压器的正序阻抗（）负序阻抗。

- A. 等于
- B. 始终大于
- C. 始终小于
- D. 可能大于也可能小于



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

零序阻抗及其等效电路

零序阻抗及零序等效电路相对比较复杂一些：

- 1、零序电流能否流通与**绕组连接方式**有关；
- 2、零序阻抗的大小与**磁路系统**(独立或相关)有关。

零序电流为：
$$\dot{i}_{a0} = \dot{i}_{b0} = \dot{i}_{c0} = \frac{1}{3}(\dot{i}_a + \dot{i}_b + \dot{i}_c)$$
 同相、交流电

零序电流 \longrightarrow 零序磁通

能否流通与绕组连接
方式有关(Y、YN、D)

大小与磁路系统有关 $\left\{ \begin{array}{l} \text{彼此独立, 则 } F_0 \text{ 大} \\ \text{彼此相关, 则 } F_0 \text{ 小} \end{array} \right.$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

零序阻抗及其等效电路

• 零序电流所遇到的阻抗：零序阻抗 Z_0

1. 零序电流在变压器绕组中的流通情况
2. 零序等效电路
3. 零序磁通在变压器铁芯中流电路径
4. 零序励磁阻抗测量方法

$$\dot{I}_{A0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = \dot{I}_{B0} = \dot{I}_{C0}$$

$$\dot{i}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{i}_a + \dot{i}_b + \dot{i}_c) = \dot{i}_{b0} = \dot{i}_{c0}$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

(1) 零序电流在变压器绕组中的流通

► 零序电流能否流通与三相绕组的连接方式有关：

- **Y** 接法中无法流通
- **YN** 接法可以流通
- **D** 接法线电流中**无零序电流**，但其闭合回路能为零序电流提供通路，如果另一方有零序电流，通过感应也会在 **D** 接法绕组中产生零序电流

综上：**Yy、Yd、Dy、Dd** 无零序电流

YNd 和 **Dyn** 接法：如 **YN、yn** 中有零序电流，**d、D** 中也感应零序电流

YNy 和 **Yyn** 接法：当 **YN、yn** 中有零序电流，**y、Y** 中**不会有零序电流**



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

(2) 零序等效电路

I 首先分析零序电流的来源

II 确定初、次级侧相、线中的零序电流情况

III 零序电流的等效电路

IV 对运行的影响



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

零序等效电路

4种可能有零序电流的接法中，只分析对运行影响大的2种接法：YNd、Yyn

(A). YNd接法的零序等效电路

零序电流由电源中零序电压引起

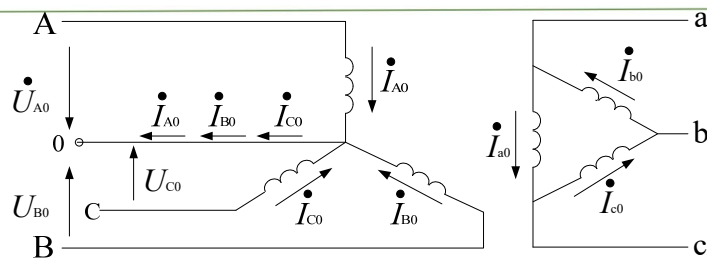


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

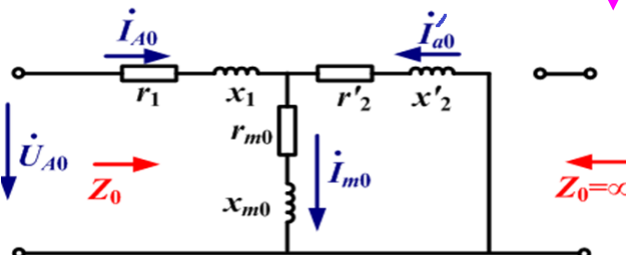
(A) YNd 接法的零序等效电路

中
零
序
电
流
由
电
源
中
零
序
电
压
引
起



初、次级侧均能流通零序电流，但是不能流向次级侧负载电路。

d 连接是闭合绕组，等效电路的次级侧为短路



一次侧A相绕组上的正序电压 \dot{U}_{A0}



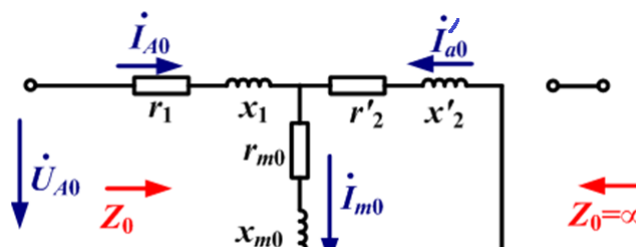
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

(A) YNd 接法的零序等效电路

$$Z_0 = Z_1 + \frac{Z'_2 Z_{m0}}{Z'_2 + Z_{m0}} \approx Z_1 + Z'_2 = Z_k$$

$$\dot{I}_{A0} = \frac{\dot{U}_{A0}}{Z_0} \approx \frac{\dot{U}_{A0}}{Z_1 + Z'_2}$$

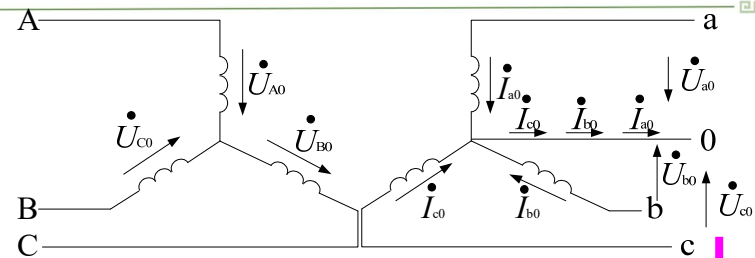
- **YNd** 接法的零序阻抗是一很小的阻抗
- 电源有较小的 \dot{U}_{A0} ，会引起较大的零序电流，导致变压器**过热**
- 应有保护措施监视中线电流



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

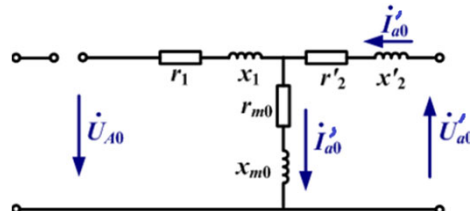
(B) Yyn 接法的零序等效电路

零序电流由次级侧
有中线电流引起



初级侧无零序电流，但感应零序（相）电势，有较大零序阻抗

如果 Z'_0 较大，较小的中线电流会造成相电压较大的不对称，其不对称的程度还与变压器的磁路有关



$$\dot{U}'_{a0} = \dot{I}'_{a0} * Z'_0 = \dot{I}'_{a0} * (Z'_2 + Z_{m0})$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

(3) 零序磁通在铁芯中流通过程

- 由于三相的零序电流在时间上同相位，所产生的三相零序磁通及其感应的三相零序电势各相均同相位

三相零序电流 (同相) \longrightarrow 三相零序磁通 (同相) \longrightarrow 三相零序电势 (同相)

- 零序磁通及其感应电势的大小与磁路系统有关

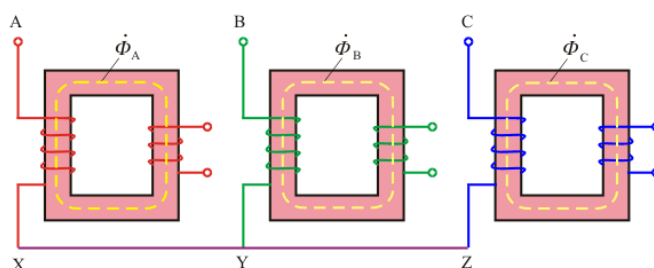


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

(A) 三相磁路獨立

- 零序磁通路径与正序、负序磁路相同，磁阻较小，零序励磁阻抗较大



$$Z_{m0} = Z_m = r_m + j x_m$$



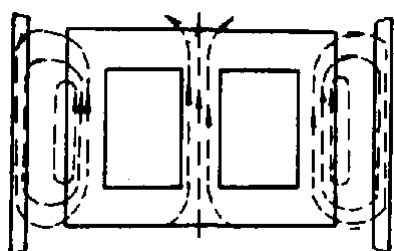
東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

(B) 三相磁路相关

- 零序磁通只匝链各自绕组，以变压器油及油箱壁为回路，磁阻较大，零序励磁阻抗较小

$$Z_{m0} \ll Z_m$$



Z_{m0}^* 大约为 0.3~1

Z_m^* 大约是 20 以上



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

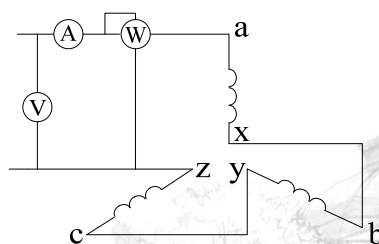
(4) 零序励磁阻抗测量方法

- **YNd 或 Dyn**: $Z_{k0} = Z_k$ 不计零序励磁阻抗
- **Yyn 或 YNy**: 模拟施加三相零序电压
- **Yyn**: 把次级三个相绕组按首尾次序串联，接到单相电源，初级侧开路
- 测量电压 U 、电流 I 和输入功率 P ，计算出零序励磁阻抗

$$Z_0 = U/3I$$

$$r_0 = P/(3I^2)$$

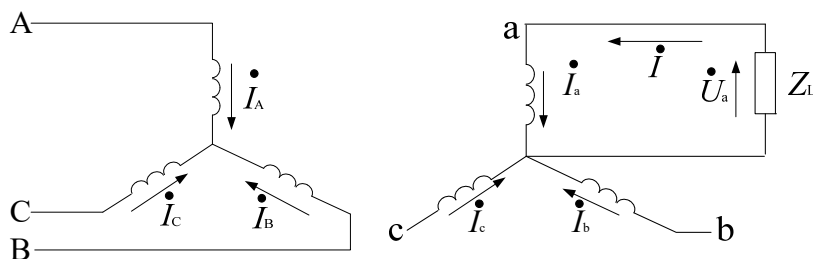
$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 三相变压器Yyn连接单相运行



- 零序电流由次级侧有中线电流引起
- 初级侧无零序电流，但感应零序（相）电势，有较大零序阻抗 $\dot{U}_{a0} = \dot{I}_{a0} * Z_0 = \dot{I}_{a0} * (Z_2 + Z_{m0})$
- 如果 Z_0 较大，较小的中线电流会造成相电压较大的不对称，其不对称的程度还与变压器的磁路有关

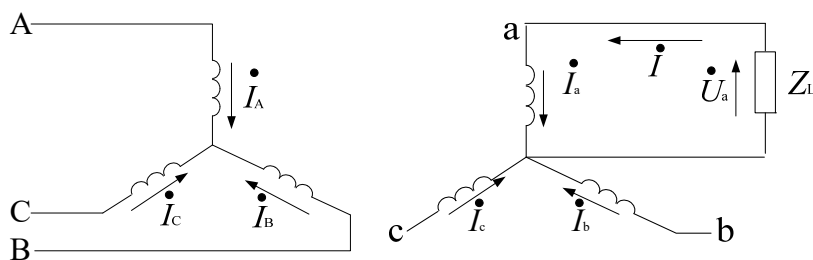


东南大学电气工程学院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 三相变压器Yyn连接单相运行



- 假设：外施电压为对称三相电压
- 求：负载电流 \dot{I} ，初级侧电流 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C ，初级、次级侧相电压 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 和 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c
- 目的：分析 Yyn 接法中的零序电流的影响



东南大学电气工程学院

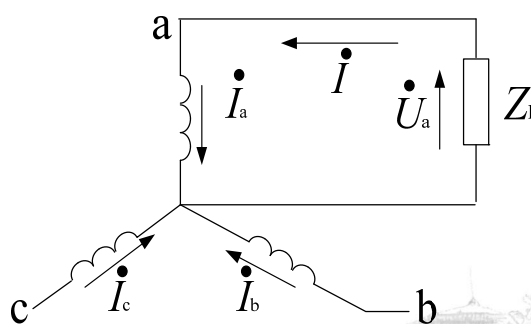
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 三相变压器Yyn连接单相运行

步骤1. 列出端点方程

$$\begin{aligned}\dot{I}_a &= \dot{I} \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_c = 0 \\ \dot{U}_a &= \dot{I} Z_L\end{aligned}$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 三相变压器Yyn连接单相运行

步骤2. 分解为对称分量

$$\dot{I}_a = \dot{I} \quad \dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$$



$$\dot{I}_{a+} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \alpha \dot{I}_b + \alpha^2 \dot{I}_c) = \frac{1}{3} \dot{I}$$

$$\dot{I}_{a-} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \alpha^2 \dot{I}_b + \alpha \dot{I}_c) = \frac{1}{3} \dot{I}$$

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = \frac{1}{3} \dot{I}$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 三相变压器Yyn连接单相运行

步骤2. 分解为对称分量

初级侧星形连接，无零序电流通路，相电流只有正序与负序分量

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A+} + \dot{I}_{A-} = -(\dot{I}'_{a+} + \dot{I}'_{a-}) = -\frac{2}{3}\dot{I}'$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B+} + \dot{I}_{B-} = -(\alpha^2 \dot{I}'_{a+} + \alpha \dot{I}'_{a-}) = \frac{1}{3}\dot{I}'$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C+} + \dot{I}_{C-} = -(\alpha \dot{I}'_{a+} + \alpha^2 \dot{I}'_{a-}) = \frac{1}{3}\dot{I}'$$



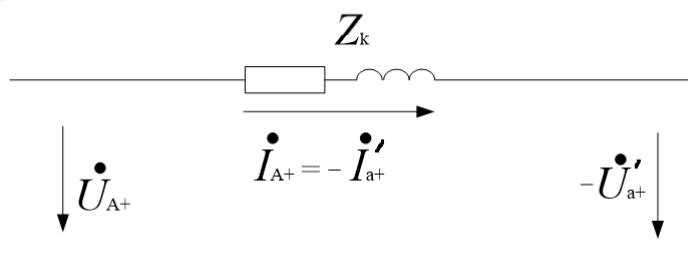
东南大学电气

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

3. 三相变压器Yyn连接单相运行

电压分析：正序，负序，零序

- 条件：外施线电压为对称，没有负序分量电压和零序分量电压，各绕组上的正序电压 \dot{U}_{A+} 、 \dot{U}_{B+} 、 \dot{U}_{C+} 即为电源相电压



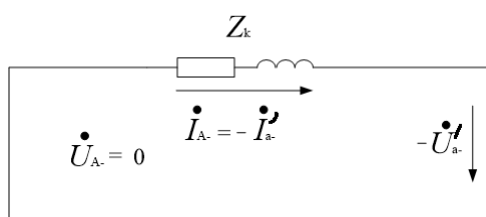
东南大学电气工程学院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 三相变压器Yyn连接单相运行

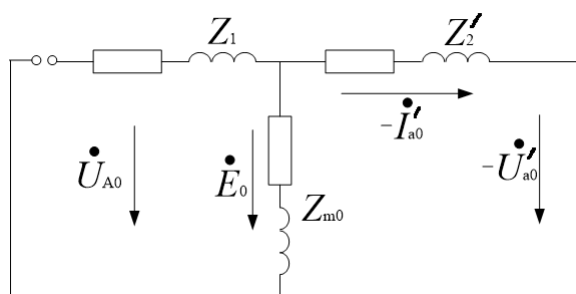
- 次级侧产生负序分量电流和零序分量电流，产生相应的负序磁通和零序磁通，在初级、次级绕组中感应负序分量电压和零序分量电压
- 初级侧中感应的负序电压产生初级侧负序流 i_{A-} 、 i_{B-} 、 i_{C-} ，以电源为回路，对负序电流初级、次级磁势平衡，不建立负序主磁通，负序压降即为负序阻抗压降（漏抗压降），值不大



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

3. 三相变压器Yyn连接单相运行

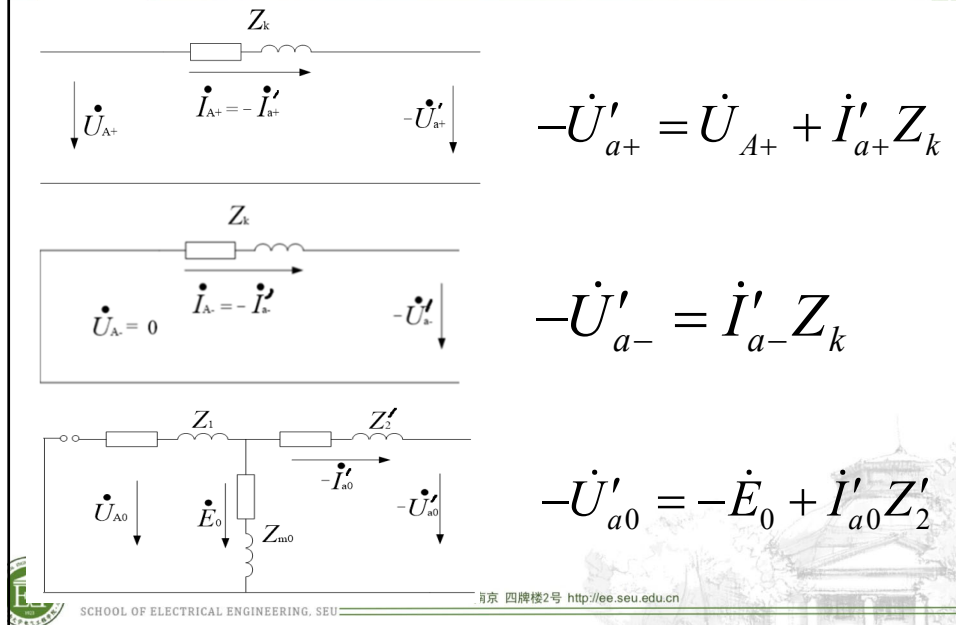
- 零序电流只能在二次侧流通，在一次侧电路中虽感应有零序电动势，但零序电流无法流通。二次侧零序电流 i_{a0} 、 i_{b0} 、 i_{c0} 全部为励磁电流性质，因此一次的零序压降即等于零序电动势



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

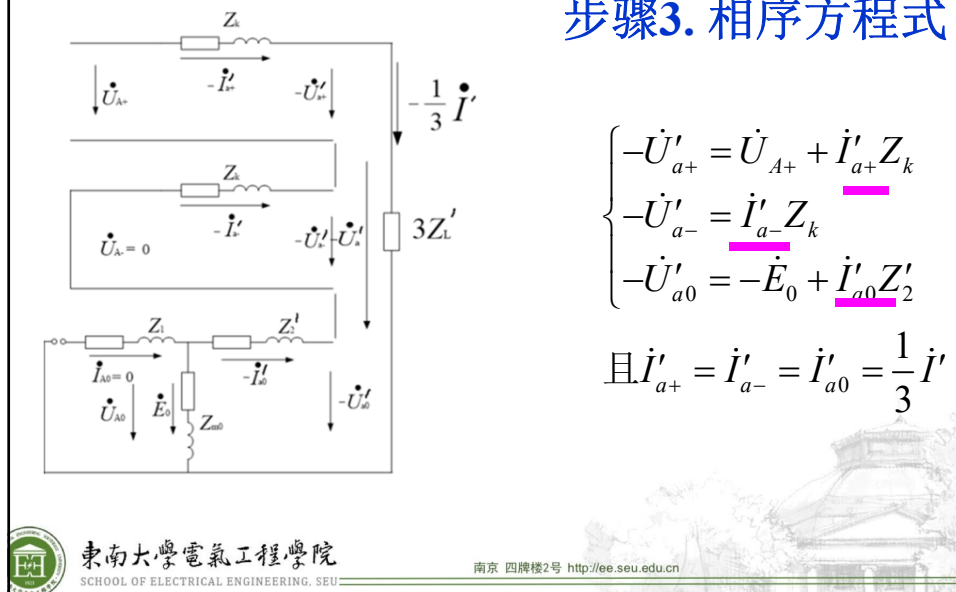
南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 三相变压器Yyn连接单相运行



3. 三相变压器Yyn连接单相运行

步骤3. 相序方程式



3. 三相变压器Yyn连接单相运行

步骤4. 求解

零序励磁阻抗相当于在负载中增加了一个阻抗 $Z_{m0}/3$

a相电流为:

$$-\dot{I}'_{a+} = -\dot{I}'_{a-} = -\dot{I}'_{a0} = \frac{\dot{U}_{A+}}{2Z_k + Z'_2 + Z_{m0} + 3Z'_L}$$

负载电流为:

$$-\dot{I}' = -(\dot{I}'_{a+} + \dot{I}'_{a-} + \dot{I}'_{a0}) = \frac{3\dot{U}_{A+}}{2Z_k + Z'_2 + Z_{m0} + 3Z'_L}$$

如略去 Z_k 和 Z'_2

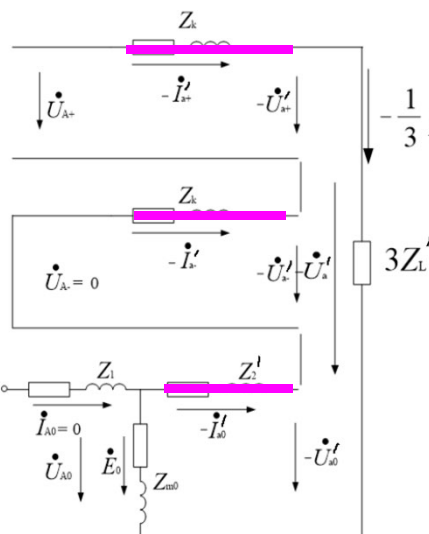
$$-\dot{I}' = \frac{3\dot{U}_{A+}}{Z_{m0} + 3Z'_L} = \frac{\dot{U}_{A+}}{Z_{m0}/3 + Z'_L}$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 三相变压器Yyn连接单相运行



如略去 Z_k 和 Z'_2

$$-\dot{U}'_a = \dot{U}_{A+} - \dot{E}_0 = \dot{U}_A$$

$$-\dot{U}'_b = \dot{U}_{B+} - \dot{E}_0 = \dot{U}_B$$

$$-\dot{U}'_c = \dot{U}_{C+} - \dot{E}_0 = \dot{U}_C$$

一次侧:

各绕组上的正序电压 \dot{U}_{A+} 、 \dot{U}_{B+} 、 \dot{U}_{C+}

各绕组上的负序电压 \dot{U}_{A-} 、 \dot{U}_{B-} 、 \dot{U}_{C-}

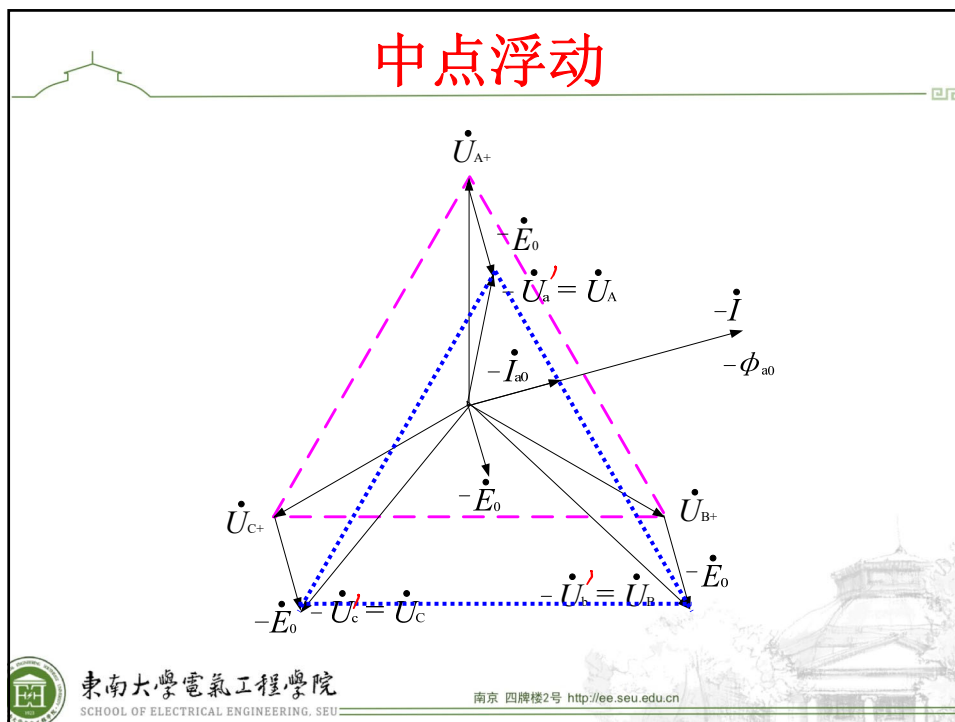
各绕组上的零序电压 \dot{U}_{A0} 、 \dot{U}_{B0} 、 \dot{U}_{C0+}



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

中点浮动



中点浮动

- ▶ 外施电压对称，当次级侧接有单相负载后，在每相绕组上都叠加有零序电势，造成相电压不对称，在相量图中表现为相电压中点偏离了线电压三角形的几何中心
- ▶ 中点浮动的程度主要取决于零序电势 E_0 ，而 E_0 的大小取决于零序电流的大小和磁路结构

中点浮动

- **三芯柱结构**：零序磁通的磁阻较大，即 Z_{m0} 较小。适当地限制中线电流，则 E_0 不会太大。运行规程规定三芯柱变压器如按 Yyn 接法运行应限制中线电流不超过 $0.25 I_N$
- 中线电流 $I_0 = I_a + I_b + I_c = 3I_{a0}$
因此， I_{a0} 应小于 $0.0833 I_N$
设 $Z_{m0^*} = 0.6$ ， $I_{a0} = 0.0833 I_N$
则 $E_{0^*} = I_{a0} Z_{m0^*} = 0.05$ ，相电压偏移不大
- **影响**：零序磁通途经变压器油箱，引起油箱壁局部发热



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

中点浮动

- **三相变压器组**：各相磁路独立，零序磁阻较小， $Z_{m0} = Z_m$
- 很小的零序电流也会感应很大的零序电势，中点有较大的浮动，造成相电压严重不对称
- 如一相发生短路，即 $Z_L = 0$
 $-I = 3U_{A+}/Z_m = 3I_0$ 短路电流仅为正常励磁电流的3倍
 $U_a = 0$ ，则 $E_0 = U_{A+}$ ，零序电势大，中点浮动到A顶点
- 叠加于BC相，B、C相电压均等于原额定线电压1.732倍
- **结论**：三相变压器组不能接成 Yyn 运行



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

结论

- (1) 正序、负序和零序系统都是对称系统。当求得各个对称分量后，再把各相的三个分量叠加便得到不对称运行情形
- (2) 不同相序具有不同阻抗参数
- (3) 对称分量法根据叠加原理，只适用于线性参数的电路中



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

结论

- 零序分量电流三相同相，其流经变压器的情况与变压器的连接方法有关：
 - A. Yy ; Yd ; Dy ; Dd 连接无零序电流
 - B. YNd ; Dyn 连接零序电流在双侧绕组内均可流通
 - C. YNy ; Yyn 连接零序电流只能在 YN 、 yn 侧流通
- 在零序电流可以流通的连接组中，其零序阻抗的大小还与变压器的磁路结构有关



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

不对称运行的分析步骤

- 列出端点方程式
- 把不对称的三相电压和电流分解为对称分量
- 列出相序方程式，画出等效电路图
- 求解电流和电压，或作出相量图用于定性分析



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

作 业

➤ 习题： p. 73-74: 4-1的第一小问



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

4. 变压器二次侧突然短路时的瞬态过程

- 瞬态过程
- 过电流的影响
 - 发热现象
 - 电磁力作用



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

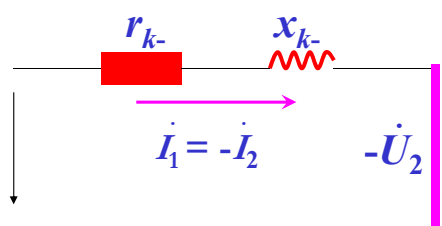
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

1. 瞬态过程

➤ 当变压器二次侧突然发生短路时，短路电流很大。若忽略励磁电流 $i_k = i_1 = -i_2'$

➤ 等效电路微分方程

$$L_k \frac{di_k}{dt} + r_k i_k = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha) \quad \dot{U}_1$$



$$i_k = i_{ks} + i_{kt}$$

稳态短路电流分量，决定于电压和短路阻抗

瞬态短路电流分量，决定于瞬时电流衰减常数

$$i_k = \sqrt{2} \frac{U_1}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \theta_k) + C e^{-\frac{r_k}{L_k} t}$$

$$C = -\sqrt{2} I_k \sin(\alpha - \theta_k)$$

与短路时电压初始相位有关



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

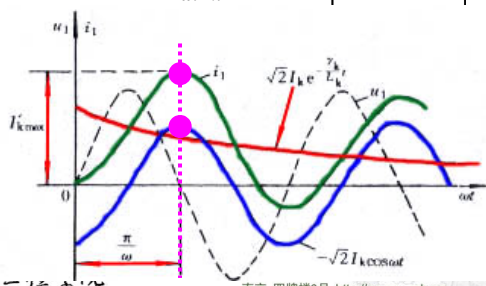
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

1. 瞬态过程

$$i_k = \sqrt{2}I_k \left(\sin(\omega t + \alpha - \theta_k) - \sin(\alpha - \theta_k) e^{-\frac{r_k}{L_k} t} \right)$$

1. 当 $\alpha = \theta_k$ 时，瞬态电流分量为0，短路后立刻进入稳态
2. 当 $\alpha = \theta_k \pm 90^\circ$ 时，瞬态分量有最大值，在短路后的半周期电流达到最大值

$$i_{k \max} \Big|_{\omega t = \pi} = \sqrt{2}I_k \left(1 + e^{-\frac{r_k}{X_k} \pi} \right) = \sqrt{2}I_k K_s$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

1. 瞬态过程

➤ 过电流情况分析：

设外施电压为额定值， $z_{k*} = 0.055$ ， $r_k/x_k = 1/3$ ，则

$$\frac{i_{\max}}{\sqrt{2}I_N} = \frac{K_s}{z_{k*}} = \frac{1.35}{0.055} = 24.5$$

可见：短路瞬间的冲击电流很大



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

2. 过电流的影响

➤ 发热现象:

设外施电压为额定值, $z_{k*}=0.055$, 则

$$I_k = \frac{U_N}{z_k} = \frac{1}{z_{k*}} I_N = \frac{1}{0.055} I_N = 18 I_N$$

短路电流产生的铜损耗是正常铜损耗的 **18²** 倍

影响:

使绕组温度急剧上升, 产生过热, 需进行过热保护



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

2. 过电流的影响

➤ 电磁力作用:

设外施电压为额定值, $z_{k*}=0.055$,

$$I_k = \frac{U_N}{z_k} = \frac{1}{z_{k*}} I_N = \frac{1}{0.055} I_N = 18 I_N$$

➤ 电磁力 (由漏磁场和电流作用产生) 也与电流的平方成正比, 绕组上产生很大的机械应力, 径向有外张力和内压力, 轴向里从绕组两端挤压绕组

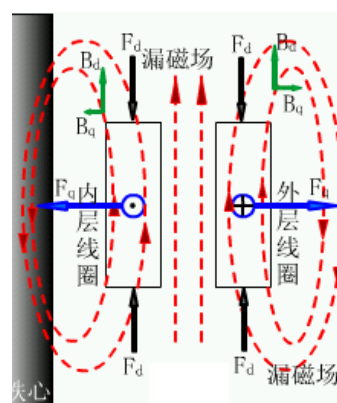
措施:

加强绕组的机械强度; 设计较大的短路阻抗限制电流



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>



5. 变压器空载合闸时的瞬态过程

➤ 瞬态过程

➤ 过电流的影响



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

1. 瞬态过程

➤ 励磁电流瞬时值 i_m :

$$N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} + r_1 i_m = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha) \quad \dots \quad \text{回路电压方程}$$

$$\Phi_1 = f(i_m) \quad \dots \quad \text{磁化曲线}$$

忽略 $r_1 i_m$, 假设电感为常数 L_{av} , 则:

$$L_{av} = \frac{N_1 \Phi_1}{i_m} \rightarrow i_m = \frac{N_1 \Phi_1}{L_{av}}$$

Φ_1 的线性方程

$$N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{r_1 N_1}{L_{av}} \Phi_1 = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha)$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

1. 瞬态过程

磁通的解，包括稳态分量 Φ_1' 和瞬态分量 Φ_1'' ：

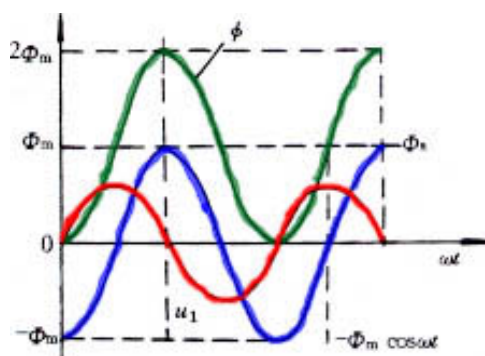
$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \Phi_1' + \Phi_1'' \\ &= \frac{\sqrt{2}U_1}{N_1\omega} \sin(\omega t + \alpha - 90^\circ) + Ce^{-\frac{r_1}{L_{av}}t} \\ &= \Phi_m \left(\sin(\omega t + \alpha - 90^\circ) + \cos \alpha e^{-\frac{r_1}{L_{av}}t} \right)\end{aligned}$$

- 接通电源瞬间 $\alpha=0$

$$\Phi_1 = -\Phi_m \cos \omega t + \Phi_m e^{-\frac{r_1}{L_{av}}t}$$

- 接通电源瞬间 $\alpha=90^\circ$

$$\Phi_1 = \Phi_m \sin \omega t \quad \text{立即进入稳态，无冲击电流}$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

2. 过电流的影响

➤ 数倍于额定电流，远小于短路电流，对变压器本身
无直接危害

➤ 合闸开始后数周期内的冲击电流可能使变压器的保护
装置误动作

➤ 措施：合闸时串入限流电阻，（1）限制冲击电流；
（2）使其快速衰减。



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>